

Wykorzystanie pomiarów wyładowań niezupełnych do oceny układu izolacyjnego izolatora przepustowego średniego napięcia do zastosowań technologicznych

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań wyładowań niezupełnych (wnz) w układzie izolacyjnym eksploatowanego izolatora przepustowego średniego napięcia (SN) mierzonych bezpośrednią metodą elektryczną i innymi technikami pomiarowymi wykorzystującymi czujniki pojemnościowe, indukcyjne, elektromagnetyczne oraz metodą chemiczną. Wykorzystane metody pomiarowe umożliwiają nie tylko detekcję wyładowań niezupełnych, ale również umożliwiają wnioskowanie dotyczące rodzaju wady i zawansowania procesu starzenia układu izolacyjnego. Badania izolatora przepustowego wykonano przy różnych napięciach, aby określić, czy przy napięciu znamionowym pracy będzie możliwe wykrycie typowych wnz rozwijających się podczas eksploatacyjnego starzenia. Dodatkowo przeprowadzone badania pozwoliły zweryfikować hipotezy badawcze wynikające z symulacji komputerowych układu izolacyjnego przepustu.

Abstract. The article presents results of tests of partial discharges (PD) in the insulating system of an exploited medium-voltage (MV) bushing insulator measured by direct electrical method and other measurement techniques using capacitive, inductive, electromagnetic sensors and by chemical method. The measurement methods used not only enable the detection of partial discharges, but also allow conclusions to be made regarding the type of defect and the progression of the ageing process in the insulation system. Tests of the bushing insulator were carried out at different voltages to determine whether it would be possible to detect the typical partial discharges developing during operational ageing at the rated operating voltage. In addition, the tests carried out made it possible to verify the research hypotheses resulting from computer simulations of the bushing insulation system. (The use of partial discharge measurements to evaluate the insulating system of a medium-voltage bushing insulator for technological applications).

Słowa kluczowe: wyładowania niezupełne, izolator przepustowy, układy izolacyjne, obrazy fazowo-rozdzielcze wnz

Keywords: partial discharges, bushing insulator, electric insulation systems, PRPD - Phase-Resolved Partial Discharge

Wstęp

Wyładowania niezupełne (wnz) od lat stanowią poważne wyzwanie dla służb utrzymania ruchu i remontów w elektroenergetyce zarówno zawodowej jak i przemysłowej, a zainteresowanie ich pomiarem wzdłuż całej poważnej w skutkach awarii. Wysokie wymagania niezawodnościowe odnośnie utrzymania ciągłości procesu technologicznego wymuszają poszukiwania specjalnych metod analizy stanu technicznego układów izolacyjnych, m. in. poprzez monitorowanie wyładowań niezupełnych [1]. Zwykle koszty zatrzymania produkcji, z uwagi na brak możliwości detekcji rozwijającego się uszkodzenia, bywają bardzo wysokie, szczególnie w przypadku obiektów o znaczeniu krytycznym. Dlatego kluczowe są właściwie zaplanowane pomiary diagnostyczne i wiedza związana z ich analizą prowadząca do postawienia właściwej oceny technicznej.

W czasie eksploatacji powodem występujących uszkodzeń są zmiany wewnętrzne w strukturze izolacji powodowane jej starzeniem. Dostępność czułych metod pomiarowych zachęca do poszukiwania odpowiednich technik i nowoczesnych przyrządów pomiarowych, tak aby dzięki ich zastosowaniu ograniczać koszty operacyjne.

Wybrane metody detekcji wnz wraz ze szczegółowym opisem stanu technicznego analizowanego układu przedstawiono w artykułach [2, 3, 4]. Niektóre publikacje dotyczą wprost zagadnienia niniejszego artykułu – badania wnz w olejowych układach izolacyjnych [5]. Zastosowanie anteny typu Vivaldi, sond HFCT i TEV, jako skutecznych metod detekcji wnz rekomendowano w [6, 7, 8-10].

Od wielu lat w obserwacji wyładowań niezupełnych stosuje się pomiar wykonywany z rozdzielczością fazową (PRPD - Phase-Resolved Partial Discharge) [1]. Technika ta polega na rejestracji kolejnych impulsów wnz w odniesieniu do kąta fazowego przyłożonego napięcia. W zależności od rodzaju uszkodzenia, systemu izolacji i zastosowanych materiałów, powstają odmienne obrazy wyładowań w funkcji kąta fazowego napięcia probierczego,

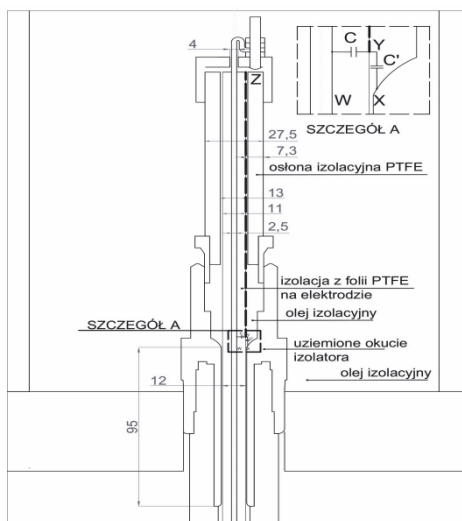
które prowadzą do ustalenia rodzaju źródła wnz, a nawet rozmiaru tworzącej się wady [1]. Fizyka pola elektrycznego i ruchu ładunków elektrycznych pozwala określić wzorce wnz wytwarzanych w różnych układach geometrycznych. Ze względu jednak na złożony mechanizm wyładowań niezupełnych w różnych strukturach izolacyjnych, wyzwaniem w dalszym ciągu jest właściwa interpretacja wzorców wnz [1] i dokładna lokalizacja źródeł wyładowań. Niekonwencjonalne metody badań wnz opisane w artykułach [3, 4] stanowią doskonałe uzupełnienie dla klasycznej metody elektrycznej zgodnej z normą [11] i są skutecznym narzędziem w programie prac profilaktycznych w przedsiębiorstwach. Metody niekonwencjonalne są stosowane w przemyśle w trybie on-line, ze względu na łatwość ich zastosowania, bez potrzeby bezpośredniej ingerencji w obwody zasilające urządzenia i ponoszenia kosztów operacyjnych związanych z przygotowaniem urządzenia do badań. Po wykryciu wnz można obserwować trend zmian, rozwój uszkodzenia i zaplanować naprawę urządzenia. Dzięki temu urządzenia o krytycznym znaczeniu dla przedsiębiorstwa można okresowo monitorować i szybko wykryć problemy w systemie izolacyjnym urządzenia [1].

Z przeglądu literatury światowej wynika, że nie przeprowadzono do tej pory badań izolatora przepustowego o specjalnej konstrukcji układu izolacyjnego do zastosowań w trudnych warunkach środowiskowych.

Cel badań

Podczas badań laboratoryjnych analizowano występujące wyładowania niezupełne w systemie izolacyjnym izolatora przepustowego średniego napięcia (SN) o konstrukcji przedstawionej na Rys. 1, wykorzystywanego w zbiorniku technologicznym przeznaczonym do odsalania ropy naftowej, gdzie panuje środowisko agresywne chemicznie, temperatura ropy osiąga 120°C – 150°C, a ciśnienie wynosi 1,5 MPa. Dodatkowo w czasie eksploatacji izolatory są narażone na

działanie sił i naprężeń mechanicznych [12]. Awarie izolatorów powodują nieoczekiwane przestoje węzła odsalania instalacji produkcyjnej, które za każdym razem są kłopotliwe dla przedsiębiorstwa.



Rys.1 Izolator przepustowy SN, $U_n = 14$ kV - napięcie znamionowe, przy $U_m = 24$ kV, $U_{wps} = 29$ kV - napięcie wytrzymałowe o częstotliwości sieciowej - wymiary górnej części izolatora

Jednym z podstawowych celów przeprowadzonych eksperymentów było sprawdzenie hipotez badawczych wynikających z symulacji komputerowych rozkładu natężenia pola elektrycznego w modelu izolatora, wykonanych metodą elementów skończonych [12]. Analizie poddano sześć różnych modeli izolatora - analizowano budowę rdzenia izolatora oraz wystąpienie różnego rodzaju wad wewnętrznych przy torze prądowym. Wyniki symulacji pozwoliły wskazać miejsca w izolatorze, w których utrata ciągłości materiału izolacyjnego lub zmiana jego parametrów powoduje pojawienie się znacznych naprężeń elektrycznych i rozpoczęcie procesu degradacji wewnętrznej [12]. Kolejnym celem badań było sprawdzenie możliwości wykrycia typowych wzn rozwijających się podczas eksploatacyjnego starzenia przy napięciu znamionowym pracy. Trzecim celem badań było określenie przydatności zastosowanych metod pomiarowych do detekcji wzn, zwłaszcza w trybie on-line [13].

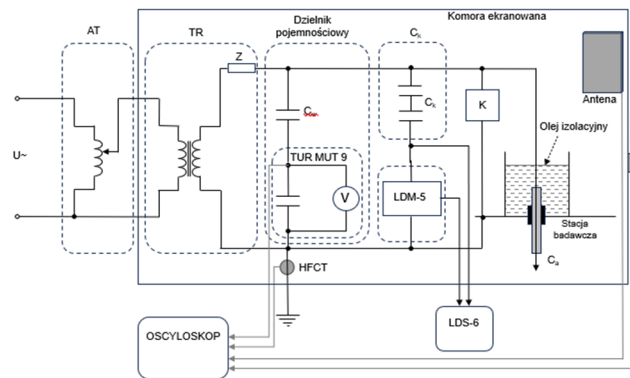
Zastosowane metody i techniki badań

Podstawową metodą wykorzystaną do identyfikacji wzn podczas badań była metoda elektryczna realizowana według wytycznych [11] i [14] w oparciu o schemat przedstawiony na Rys. 2. Obiekt badany włączono bezpośrednio między źródło napięcia probierczego a ziemię. Pomiary wzn prowadzono przy użyciu kondensatora sprzęgającego C_k połączonego szeregowo z impedancją pomiarową LDM-5. W przypadku wystąpienia wzn kondensator sprzęgający C_k doprowadza prąd płynący przez badane urządzenie, który można zmierzyć na impedancji LDM-5, przetwarzającej wejściowe sygnały prądowe na wyjściowe sygnały napięciowe przesyłane do rejestratora wzn LDS-6.

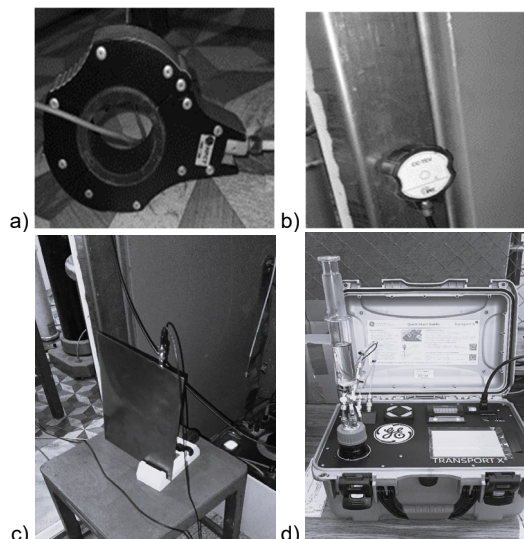
W trakcie eksperymentów prowadzono również rejestrację wzn przy użyciu dostępnych metod niekonwencjonalnych przedstawionych na Rys. 3a-d.

Do badań wzn izolatorów przepustowych SN stosuje się procedurę opisaną w normie [14], która określa wymagania dotyczące sposobu badania przepustów i akceptacji wyników. Według normy [14] maksymalne dopuszczalne poziomy ładunku pozornego wzn przy określonym napięciu próby wynoszą:

- 5 pC przy napięciu próby $1,05 \cdot U_m / \sqrt{3}$ i $1,1 \cdot U_m / \sqrt{3}$,
- 10 pC przy napięciu próby $1,5 \cdot U_m / \sqrt{3}$ i U_m



Rys.2 Schemat układu probierczego do badania izolatorów przepustowych SN, Legenda: U~ - napięcie zasilające, AT - autotransformator, TR - transformator probierczy ($S_n = 2,5$ kVA, $U_{1n}/U_{2n} = 230$ V/50 kV, 50 Hz), Z - filtr, C_w - kondensator wzorcowy ($U_n = 55$ kV, $C_n = 60$ pF, $p = 0,4$ MPa), TUR MUT 9 - przyrząd do pomiaru napięcia, C_k - kondensator sprzęgający ($C_n = 2 \times 1000$ pF $\pm 10\%$, 25 kV, 50 Hz), LDM-5 - impedancja pomiarowa, K - kalibrator LDC-5, C_a - obiekt badany, (HFCT, CC-TEV, Antena) - sondy pomiarowe, LDS-6 - rejestrator wzn firmy Doble, Oscyloskop - TDS5034B firmy Tektronix.

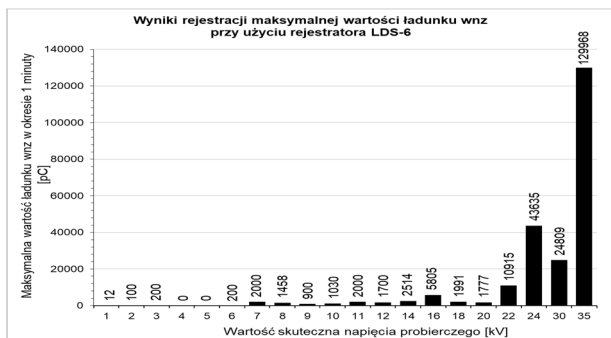


Rys.3 Przyrządy pomiarowe użyte do badań wzn: a) **wysokoczęstotliwościowy przekładnik prądowy HFCT** firmy IPEC, pasmo przenoszenia 50 kHz - 80 MHz, wejściem jest prąd przepływający przez czujnik HFCT impulsów wzn, a wyjściem jest indukowane napięcie mierzone na impedancji wejściowej przyrządu pomiarowego (50 Ω) [7] b) **sonda pojemnościowa TEV** (Transient Earth Voltage) firmy IPEC, pasmo przenoszenia 1 MHz - 80 MHz, wykrywa promieniowanie elektromagnetyczne o wysokiej częstotliwości przenoszone na uziemione powierzchnie metalowe z lokalnych wzn, c) **ultraszerokopasmowa antena Vivaldi ze zintegrowanym filtrem wycinającym szumy**, pasmo przenoszenia 0,226 - 3,506 GHz i wysoka kierunkowość sprawiają, że antena może wykrywać różne typy wzn i z różnych źródeł zapewniając szerokie zastosowanie [6] d) **przenośny analizator gazów** rozpuszczonych w oleju typu Transport X² firmy GE, chromatograf wykorzystuje technologię spektroskopii foto akustycznej (PAS).

Badania wzn i dyskusja wyników

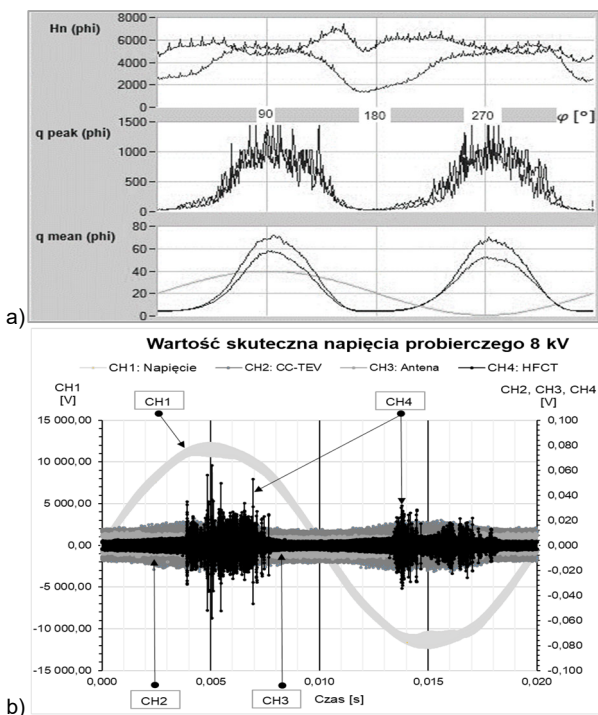
Podczas dość zaawansowanego uszkodzenia wewnętrznego izolatora metodą elektryczną rejestrowano: $H_n(\varphi)$ - liczba wzn w pC, q peak (φ) - wartości natężenia

ładunku maksymalnego wnz w pC i q mean – wartości natężenia ładunku uśrednionego wnz w pC. Powyższe wielkości rejestrowano w funkcji kąta fazowego ϕ napięcia probierczego. Badanie wnz izolatora polegało na podnoszeniu przemiennego napięcia probierczego ze skokiem co 1 kV do wartości 35 kV. Napięcie utrzymywano przez czas 60 s, dla którego rejestrowano wszystkie ładunki wnz. Następnie wyznaczano rozkłady fazowo – rozdzielcze liczby wnz oraz maksymalnej i średniej wartości ładunku wnz w okresie 1 minuty dla określonych wartości napięcia próby (Rys. 4).



Rys.4 Wyniki rejestracji maksymalnej wartości ładunku wnz w okresie 1 minuty podczas badań izolatora przepustowego SN.

Równocześnie z rejestracją wnz metodą elektryczną, zapisywano oscyloskopem przebiegi amplitudy sygnałów z sond pomiarowych w funkcji kąta fazowego napięcia probierczego. Następnie podjęto próbę rozróżnienia typu wnz na podstawie otrzymanych rozkładów natężenia ładunków wnz (Rys. 5-7 a i b) [2].

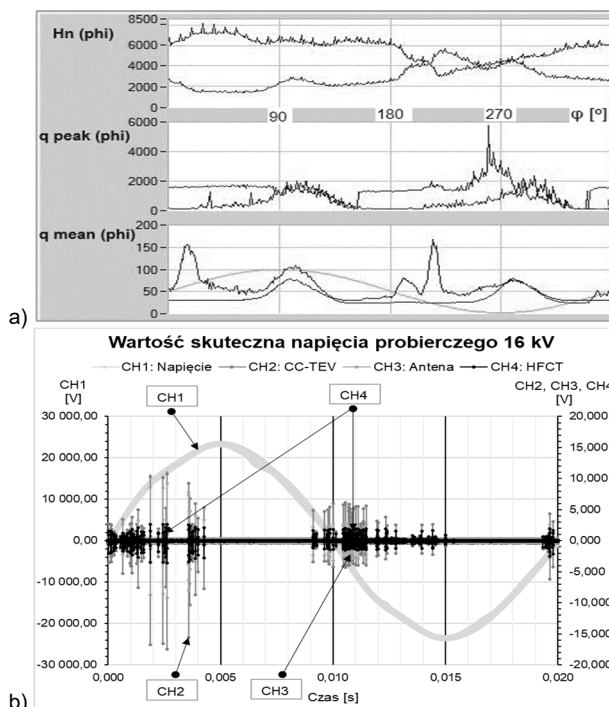


Rys.5 a) wyniki pomiaru natężenia ładunku wnz dla izolatora otrzymane metodą elektryczną przy napięciu 8 kV w czasie 60 s, b) oscylogram sygnałów z sond pomiarowych przy 8 kV

Przy napięciu 8 kV na Rys. 5a, zarejestrowano narastanie natężenia ładunku dodatniego i ujemnego wnz wraz z amplitudą napięcia do wartości maksymalnej i następnie stopniową neutralizację ładunku w tej samej dodatniej półfali napięcia. Podobny obraz wyładowań występuje przy zmianie biegunowości napięcia. Z kolei na Rys. 5b, obserwujemy impulsy wnz o zróżnicowanej

intensywności, zajmujące w półfali napięcia obszar skupiony przy kącie fazowym napięcia $\phi = 90^\circ$ i $\phi = 270^\circ$. Charakter zarejestrowanych wnz wskazuje na rozwój wyładowań wewnętrznych we wtrącinach gazowych w oleju, które nie mają bezpośredniego kontaktu z elektrodami [15]. Wtrąciny gazowe mogą występować w przypadku słabo odgazowanego oleju [16]. Powodem tego mogą być zbyt wąskie szczeliny olejowe wzdłuż izolacji przebiegowej izolatora. W przypadku pojawienia się w oleju wtrącin gazowych o nieregularnych kształtach wnz powtarzają się, ale w sposób przerywany, nieregularny [16].

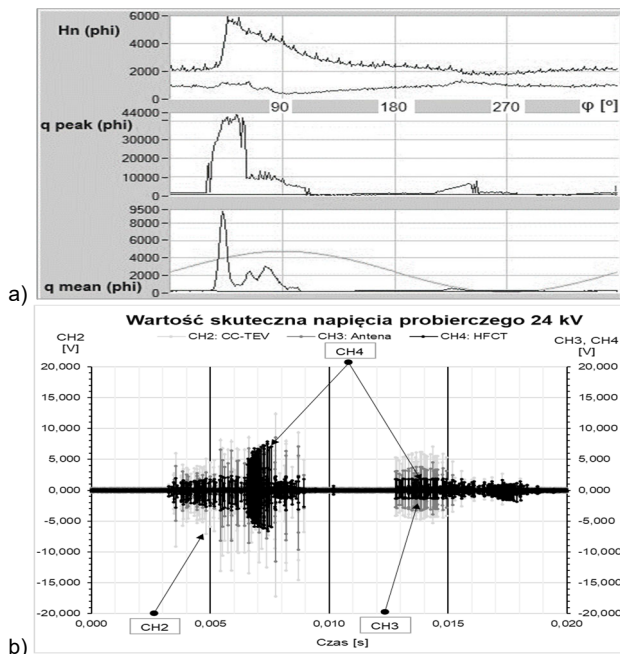
Przy napięciu 16 kV w obrazie natężenia ładunku maksymalnego wnz (Rys. 6a), po przejściu napięcia z biegunowości dodatniej do ujemnej odnotowano wzrost ładunku maksymalnego wnz o biegunowości ujemnej, przewyższający znacznie natężenie ładunku maksymalnego wnz przy dodatniej biegunowości napięcia. Na Rys. 6b obserwujemy aktywność wnz przed przejściem napięcia przez zero dla obu biegunowości, a także aktywność wyładowań od zera do wartości maksymalnej napięcia w dodatniej i ujemnej półfali napięcia. Zarejestrowane obrazy wyładowań na Rys. 6a i b świadczą o zainicjowaniu wyładowań ślizgowych.



Rys.6 a) wyniki pomiaru natężenia ładunku wnz dla izolatora otrzymane metodą elektryczną przy napięciu 16 kV w czasie 60 s, b) oscylogram sygnałów z sond pomiarowych przy 16 kV

Następnie przy napięciu probierczym $U_m = 24$ kV (Rys. 7a i b) na wykresie natężenia ładunku maksymalnego wnz pojawia się asymetria pomiędzy wyładowaniami dodatnimi i ujemnymi. Odnotowano wysokie wartości wnz dodatniej biegunowości zanikające przed kątem fazowym napięcia $\phi = 90^\circ$, przy znacznie mniejszych wnz przy ujemnej biegunowości napięcia, co może świadczyć o występowaniu wyładowań wewnętrznych w przypadku, gdy czynne są inkluzje gazowe, które bezpośrednio dotykają elektrody pod napięciem [2], [12], [15]. Podczas kontroli wzrokowej izolatora w czasie prób zaobserwowano, że w wyniku występujących wnz powstaje duża ilość pęcherzyków gazowych, które lokalizowały się w pobliżu elektrody będącej pod napięciem. Przy pomocy sond pomiarowych zarejestrowano również wysoką aktywność wnz. Na Rys. 7b zakres fazowy zajmowany przez impulsy

wnz jest szerszy w odniesieniu do obrazów zapisanych dla niższych wartości napięcia.



Rys.7 a) wyniki pomiaru natężenia ładunku wnz dla izolatora otrzymane metodą elektryczną przy napięciu 24 kV w czasie 60 s, b) oscylogram sygnałów z sond pomiarowych przy 24 kV

Produkty rozkładu kumulują się w oleju izolacyjnym podczas długotrwałego działania wnz. Metoda chemiczna przy wykorzystaniu chromatografii gazowej [17-18] może być wykorzystana do oceny degradacji spowodowanej przez wnz. Bezpośrednio przed przystąpieniem do badań wnz izolatora pobrano pierwszą próbkę oleju (Próbka nr 1) typu Orlen Trafo EN i poddano ją analizie chromatograficznej. Drugą próbkę oleju (Próbka nr 2) pobrano z tzw. „mgiełki gazowej” powstałej w oleju w stacji badawczej po badaniu wnz, po próbie do 16 kV. Wyniki badań próbek oleju znajdują się w Tabeli nr 1.

Tabela 1. Wyniki analizy stężenia [ppm] gazów rozpuszczonych w oleju izolacyjnym, Legenda: TDCG – Total Dissolved Combustible Gas – suma gazów palnych rozpuszczonych w oleju

gaz	poziom dopuszczalny wg [12-13] [ppm]	próbka nr 1 [ppm]	próbka nr 2 [ppm]
H ₂	80	<5	47
CO ₂	9000	1506	896
CO	900	2	118
C ₂ H ₄	50	15	361
C ₂ H ₆	90	6	245
CH ₄	90	9	132
C ₂ H ₂	1	<0,5	339
TDCG	1210	37	1242

Ocenę wyników opracowano w oparciu o wytyczne [17-18]: Próbka nr 1 – stan oleju w granicach normy, Próbka nr 2 - wyładowania elektryczne typu D2 o wysokiej energii.

Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone eksperymenty potwierdziły hipotezy wynikające z symulacji komputerowych opisanych w [12].

Podczas badań obserwowano częste zmiany charakteru wnz. Metodą elektryczną rejestrowano wysokie wartości natężenia ładunku wnz, przekraczające poziomy dopuszczalny wg normy [14]. Metoda elektryczna pomiaru wnz pozwoliła uzyskać dobrą ocenę charakteru i rozróżnienie wnz.

Wyniki analizy chromatograficznej próbek oleju potwierdzają występowanie w izolacji wyładowań o wysokiej energii. Największe zagrożenie w pracy izolatora powoduje występowanie acetyleny, którego obecność świadczy o wyładowaniach zupełnych o dużej gęstości energii [17].

Do monitoringu stanu izolatora w trybie on-line rekomenduje się zastosowanie czujnika HFCT, który skutecznie wykrywa wnz rozwijające się w złożonym systemie izolacyjnym badanego przepustu.

Nie udało się określić dokładnie wymiaru i lokalizacji wad. Wykonana analiza konstrukcji badanych izolatorów wskazuje na najbardziej prawdopodobną lokalizację wad, które rozwijają się w szczelinie olejowej na przejściu rdzenia izolatora przez tuleję połączoną z uziemionym okuciem.

Wykonane badania wskazały obszary, w których można technologicznie poprawić jakość układu izolacyjnego.

Autorzy: mgr inż. Paweł Pankowski, pawel.pankowski@pg.edu.pl, dr hab. inż. Marek Olesz, marek.olesz@pg.edu.pl; Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, ul. G. Narutowicza 11/12, 80 – 233 Gdańsk; Sayed Mohammad Kameli B. S., sayed.kameli@qatar.tamu.edu; Department of Electrical and Computer Engineering, Texas A&M University at Qatar, Education City PO Box 23874, Doha, Qatar

LITERATURA

- [1] Florkowski M., Partial Discharges in High-Voltage Insulating Systems, AGH, (2020), Kraków
- [2] Stone G. C., Partial discharge diagnostics and electrical equipment insulation condition assessment, *IEEE Trans. On Dielectrics and Electrical Insulation*, 12 (2005), 891–904
- [3] Hussain G. A. et al., Review on PD Diagnostic Techniques for High Voltage Equipment in Power Systems, *IEEE Access*, 11 (2023), 51382-51394
- [4] Rodriguez-Serna J. M. et al., Partial discharges measurements for condition monitoring and diagnosis of power transformers: A review, *IEEE Xplore*, (2020)
- [5] Boczar T., Zmarzły D., Optical Spectra of Surface Discharges in Oil, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 13 (2006), No. 3, 632-639
- [6] Kameli S. M. et al., Ultra-Wideband Vivaldi Antenna with an Integrated Noise-Rejecting Parasitic Notch Filter for Online Partial Discharge Detection, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, (2024), No. 73, 1 – 10
- [7] Alvarez F. et al, Application of HFCT and UHF Sensors in On-Line PD Measurements for Insulation Diagnosis of High Voltage Equipment, *Sensors*, (2015), 15 (4), 7360-7387
- [8] Suwanasri C. et al., Partial Discharge Detection in High Voltage Equipment Using High Frequency Current Transducer, *GMSARN International Journal*, 7 (2013), 53–58
- [9] Birlasekaran S. et al., Comparison of Known PD Signals with the Developed and Commercial HFCT Sensors, *IEEE Trans. Power Delivery*, 22 (2007), 3, 1581-1590
- [10] Lachance M. et al., The use of TEV sensors for online PD detection in oil-filled transformers, *IEEE Xplore*, (2023)
- [11] PN-EN 60270:2003 Wysokonapięciowa technika probiercza – Pomiary wyładowań niezupełnych.
- [12] Pankowski P., Olesz M., Optymalizacja izolatora przepustowego średniego napięcia do zastosowań technologicznych, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2024), nr 3, 95-99
- [13] IEC TS 62478:2016 High voltage test techniques - Measurement of partial discharges by electromagnetic and acoustic methods.
- [14] PN-EN 60137:2018-02 Izolatory przepustowe na napięcia przemienne powyżej 1000V
- [15] Fuhr J., Procedure for Identification and Localization of Dangerous PD Sources in Power Transformers, *IEEE*, 12 (2005), No. 5, 1005-1014
- [16] Skubis J., Emisja akustyczna w badaniach izolacji urządzeń elektroenergetycznych, *PAN*, (1993), Warszawa
- [17] Szymański Z., Ramowa instrukcja eksploatacji transformatorów, *Energopomiar – Elektryka*, (2022), Gliwice
- [18] PC57.104/D6.2, Mar 2019 - IEEE Approved Draft Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil – Immersed Transformers, *IEEE*, (2019)